

内 22-8

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

電磁界中における電磁粒体のダイナミクスと
画像形成技術への応用に関する研究

Study on Dynamics of Electromagnetic Particles
in Electromagnetic Field
and Application to Imaging Technology

申 請 者

中 山 信 行

Nobuyuki Nakayama

機械工学 精密工学



2002年 11月

画像形成装置は、視覚を介して情報を記録・伝達する重要な情報精密機器であり、なかでも電子写真方式のレーザプリンタは、高速・高画質で普通紙適性が高いことなどから、特に高速機の分野で多く用いられている。この電子写真プロセスは、電磁気力を利用して微粒子の運動を高速・高精度に制御する技術を基盤としており、工学的には“電磁気力による粉体輸送の精密制御プロセス”と位置づけることができる。とりわけ、帯電着色微粒子（トナー、粒径 $5\sim 15\mu\text{m}$ ）を磁性粒子チェーン（磁界中で形成される粒子クラスタ）を介して磁気力で搬送し、静電気力を利用して感光体上の静電潜像にトナーを付着させる現像工程、および現像されたトナー画像を用紙などの媒体に静電的に写し取る転写工程においては、粉体の輸送制御が基本的に重要となる。しかし、環境条件に敏感な静電気を利用し、しかも電磁氣的、機械的現象が複合した極めて複雑な機構により目的とする機能を実現させていることから、プロセス中の物理現象を定量的に把握することが困難となっている。したがって未解明の現象もまだ多く、これが本質的な性能向上の最大の阻害要因となっている。

このため、これまでプロセスの体系的理論化のアプローチが継続的になされており、高品質化と設計の高効率化に寄与してきている。しかし、既存の研究は電磁気学と連続体力学に基づいた粉体輸送量の議論に集中しており、粉体固有の力学特性や運動性能についてはほとんど議論されていなかった。画像品質に対する要求の高度化にともなって、未解明現象のメカニズム解明とそれに基づく抜本的改善策の提案が大きな課題として残されている。このような観点から、電磁界中での電磁粒体の力学特性を明らかにすること、特に、粒子個々の挙動に着目した体系的研究が不可欠と考えられる。また、対象が微小であり実験的調査に限界があることから、研究の過程では粉体挙動の数値シミュレーション技術が必須と考えられる。近年、一つ一つの粒子運動を簡単なモデルで記述し、その素過程の集合として粉体全体の挙動を再現する方法が多用されてきている。その代表的手法である個別要素法は、個々の粒子の運動方程式を解いて粉体集合体の挙動を再現する手法であり、方程式中で電磁力を考慮することで、電磁界中での電磁粒子挙動を再現することも可能と考えられる。

そこで本研究では、電子写真プロセス中の粉体挙動を電磁界中における電磁粒体のダイナミクスとして捉え、モデル実験と個別要素法に基づく数値シミュレーション、さらに理論的考察からその基礎的特性やメカニズムを体系的に明らかにすることを目的とする。特に、粉体が直接関与する転写および現像工程に着目し、プロセス中で観察される電磁粒体特有の現象や画像劣化の基礎特性把握とメカニズム解明により有益な設計情報の抽出を行った。さらにこの過程で、個別要素法を基礎とする電磁粒体の数値シミュレーション手法を提案し、その有効性を検証した。

本論文は、第1章から第7章までの7章から構成されており、第1章では序論、第

2章から第6章までで本論，第7章では結論を述べる。

第1章の序論では，電子写真プロセスの詳細な説明を交え，研究の背景，課題，これまでの関連研究，研究目的と内容の概略，さらに本論文の構成について述べた。

第2章においては，電磁粒体力学の基礎理論として，まず本研究の骨子となる個別要素法シミュレーションアルゴリズムを述べた。さらに，電磁粒体挙動を再現する際に最大の特徴となる電磁相互作用を中心とし，粒体に作用する力についてその理論的取り扱いを体系的にまとめ，これら作用力の概算から電子写真プロセス中で支配的な力を明らかにした。

つぎに第3章では，転写工程を想定した電界中の帯電粒子挙動シミュレーション方法を新たに提案し，従来議論されていない転写工程における帯電粒子挙動および代表的画像劣化（線画像中央が欠落する中抜け現象およびトナーが画像周辺に飛散する現象）メカニズムの解明を行った。トナーに作用する外力として，Hertz接触則と塑性変形を考慮した機械的接触力，転写電界による静電気力，および物体間の付着力を考慮したアルゴリズムを構築し，圧縮作用を含む転写工程中のトナー層の挙動に関する数値シミュレーションを行った。トナー層圧縮解析から，その変形状態，特に特徴的である中央部の圧密状態や圧力-ひずみ関係を明らかにし，実験結果との比較から本解析アルゴリズムの妥当性を示した。同時に，圧縮時に個々のトナーに作用する付着力の変化を調査し，高圧縮トナー層中央部のトナーの塑性変形と付着力変化による中抜け現象発生メカニズムを提示した。線画像の転写過程を想定したシミュレーションでは，中抜け現象を再現して上記メカニズムを検証するとともに，改善策とその有効性を示した。トナー飛散については，数値的に現象を再現して定性的に妥当な結果を得るとともに，飛散現象を回避するための設計上の留意点を明らかにした。

続いて第4章から第6章では，現像工程で画質に大きく影響する磁性粒子チェーンに関して，これまで体系的な調査がなされていない静力学，動力学的特性，さらに電磁作用に関する研究を実施した。

第4章では，チェーンの静力学的特性を明らかにすることを目的として，ソレノイドコイルを利用してチェーンを形成し，その長さや傾斜角を計測した。計測結果から，チェーン長さの磁束密度，粒子数，および粒径依存性を明らかにし，また，傾斜磁界中で形成されるチェーンの傾斜角が重力により増幅されること，その増幅率が磁束密度に依存することを示した。ついで，磁気相互作用を考慮した二次元個別要素法による数値シミュレーションを行い，チェーンの形成が定性的に再現可能であることを示した。さらに，モデルを三次元に拡張することにより，チェーン形成過程，チェーン長さ，およびチェーン傾斜特性が，定量的に高精度に再現できることも明らかにした。最後に，これらチェーンの静的安定状態が，おおむねポテンシャルエネルギーを最小化するように決定していることを示した。

第5章では、チェーンの動力学的特性に着目した研究について述べた。ソレノイドコイル上に形成したチェーンの加振実験から、共振周波数と等価剛性を評価し、磁界との関連を調べた。チェーンの固有振動数は磁界、粒径、粒子重量にほとんど依存しないが、固有振動数から算定した等価剛性は、磁界増加により増大傾向を示すことを明らかにした。ついで、個別要素法に基づく二次元数値シミュレーションから、磁束密度増加による共振周波数増加、チェーン長さ増大による共振周波数低下、さらに両者の影響を加味した磁界による共振周波数変化を定性的に表現できることを示した。また、静力学特性と同様に共振周波数の変化に対する理論的説明を試み、チェーンの等価剛性が粒子1個あたりの平均ポテンシャルエネルギーに比例する、との仮説により、チェーンの共振周波数変化の大局的な説明が可能であることを示した。最後に、ここで算定したチェーン剛性を、第4章で述べたチェーン傾斜特性および新たに計測したチェーンの荷重-変位関係から推定した剛性と比較し、これらがいずれも磁束密度と粒径依存性を示し、磁気結合力変化と定性的に対応することを確認した。

第6章では、現像工程で発生するチェーンの電界剥離現象に関連し、チェーンに電界を作用させたときの電磁作用に関する研究を行った。電界中におけるチェーンの挙動観測から電界剥離特性を調査し、チェーンが分断剥離する限界電界強度は、粒径、磁束密度増加により増大し、磁性粒子間の磁気結合力の変化と定性的に対応すること示した。さらに電界中でのチェーン内粒子の帯電状態を、理論モデルと数値シミュレーションにより推定して両者の対応を調査するとともに、電界による静電的剥離力を算定して磁氣的結合力と対比した。その結果、本電界剥離実験においてチェーンの最先端粒子に作用する静電気力は単一球コンデンサモデルを適用して算定でき、算定値は数値計算で求められる粒子間磁気結合力と数倍程度の差異で合致することを明らかにした。

最後に第7章では、本論文を総括し、さらに今後の課題についても言及した。

以上のとおり本研究では、電磁粒体力学的観点から、転写および現像工程に代表される電磁粒子のダイナミクスに関する調査を行い、以下の成果を得た。すなわち、電磁界中の電磁粒子挙動に関する理論的基礎を明らかにし、個別要素法に基づく数値シミュレーション手法とその有用性を示した。さらに、転写、現像工程に直接関連する粒子や粒子クラスターの基礎力学特性を明らかにし、普遍的設計情報を与えると同時に、主要な転写・現像画質劣化のメカニズムと改善策を提示した。